



Luis Paulo Pires Gonçalves Ribeiro

**Caracterização das Propriedades Mecânicas do Aço SAE
4140 após Diferentes Tratamentos de Têmpera e Revenido**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Ciência dos Materiais e Metalurgia
da PUC-Rio.

Orientador: Marcos Venicius Soares Pereira

Rio de Janeiro, 06 de setembro de 2006



Luis Paulo Pires Gonçalves Ribeiro

Caracterização das Propriedades Mecânicas do Aço SAE 4140 após Diferentes Tratamentos de Têmpera e Revenido

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Marcos Venicius Soares Pereira

Orientador

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia – PUC Rio

Prof. Fathi Aref Ibrahim Darwish

Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Fernando Ribeiro da Silva

Instituto Militar de Engenharia - IME

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do Centro Técnico Científico da
PUC Rio

Rio de Janeiro, 06 de setembro de 2006

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Luis Paulo Pires Gonçalves Ribeiro

Aluno do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio entre os anos de 2004 e 2006. Graduou-se em Engenharia Metalúrgica pela UENF-RJ em setembro de 2003.

Ficha Catalográfica

Ribeiro, Luis Paulo Pires Gonçalves

Caracterização das Propriedades Mecânicas do Aço SAE 4140 após Diferentes Tratamentos de Têmpera e Revenido / Luis Paulo Pires Gonçalves Ribeiro ; orientador: Marcos Venicius Soares Pereira. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, 2006.

106 f. ;il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia.

Inclui bibliografia

1. Ciências dos Materiais e Metalurgia – Teses. 2. Energia de impacto. 3. Fragilização no revenido. 4. Microestrutura. I. Pereira, Marcos Venicius Soares. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia. III. Título.

CDD: 669

“Tudo posso naquele que me fortalece”.

A minha mãe e meu pai pelo apoio e estímulo e pela confiança em mim depositada.

A Tatiane Gabriele pelo apoio e palavras de carinho.

A minha vó pela gratidão por tudo que fez durante estes anos.

A Deus meu grande companheiro durante esta jornada.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Marcos Venicius S. Pereira, pela orientação durante este trabalho.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos professores Fathi Darwish, Ivani Bott e Roberto Carvalho que muito contribuíram durante o curso de pós-graduação.

A metalúrgica MSteel pela doação do material e suporte financeiro para a realização do trabalho.

A BrasilAmaras pela cessão de suas instalações para a realização de algumas etapas experimentais desta pesquisa.

Ao Eng^o. Sérgio Motta, gerente de tecnologia da BrasilAmaras, pela amizade e convivência durante a minha estadia na empresa.

A assistente Monique da BrasilAmaras pelo auxílio prestado durante a preparação e ensaio dos corpos de prova.

A todos os funcionários da BrasilAmaras, em especial a Antônio Balbino, meu muito obrigado.

Ao técnico Heitor Nuss do DCMM pelo auxílio prestado durante a preparação dos corpos de prova para o MEV e pela sua grande amizade.

Aos colegas de pós-graduação Percy e Fernando pela convivência durante estes anos.

RESUMO

Ribeiro, Luis Paulo Pires Gonçalves. **Caracterização das Propriedades Mecânicas do Aço SAE 4140 após Diferentes Tratamentos de Têmpera e Revenido.** Rio de Janeiro, 2006. 106 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) pertencem a uma classe de aços que desperta o interesse de pesquisadores da área metal-mecânica. A pesquisa teve como objetivos estudar a influência dos tratamentos térmicos de têmpera e revenido sobre as propriedades do aço SAE 4140 e avaliar o comportamento do aço SAE 4140 quando submetido ao revenido na faixa de temperatura característica da fragilização. Inicialmente, o material foi tratado termicamente sob diferentes condições de têmpera e revenido. Após a usinagem dos corpos de prova, foram realizados ensaios de tração e energia ao impacto, bem como caracterizações microestruturais e fractográficas. Os resultados mostraram que as propriedades mecânicas do aço SAE 4140 foram influenciadas pelos parâmetros de revenido, em particular temperatura, além do tempo de permanência no forno antes do resfriamento.

Palavras-Chave:

Energia de impacto; fragilização no revenido; microestrutura.

ABSTRACT

Ribeiro, Luis Paulo Pires Gonçalves. **Caractherization of Mechanical Properties on SAE 4140 Steel after Different Treatments of Quenching and Tempering**. Rio de Janeiro, 2006. 106 p. Master Dissertation – Department of Materials Science and Metallurgy, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

The high strength and low alloy steels (HSLA) belong to a class of steels in which researchers of the metal-mechanic area have particular interest. The aim of this work is to verify the influence of quenching and tempering heat treatments on the properties of the SAE 4140 steel as well as to evaluate its behaviour when subjected to tempering in a temperature range associated with the material's embrittlement. At first, the material was heat treated according with different quenching and tempering conditions. In the sequence, specimens machined from the treated material were subjected to tensile and impact energy tests and characterized by microstructural and fractographic analysis. The results showed that the mechanical properties of the material were influenced by the tempering parameters, specially temperature and time of treatment as well as the permanence time of the specimens in the furnace before cooling.

Key-words

Impact energy; tempering embrittlement ; microstructure.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. Microestrutura	22
2.1.1. O Papel dos Elementos de Liga	24
2.2 Fragilização no Revenido	25
2.2.1 Mecanismos de Ativação	27
2.3 Fragilização da Martensita Revenida	28
2.3.1 Mecanismos de Ativação	28
2.4 Inclusões Não-Metálicas	31
2.4.1 Tipos de Inclusões	33
2.4.1.1 Inclusões Exógenas	35
2.4.1.2 Inclusões Endógenas	36
2.4.1.2.1 Formação	37
2.4.1.2.2 Crescimento-Tamanho, Quantidade e Distribuição	38
2.4.1.2.3 Eliminação	39
2.4.2 Influência das Inclusões nas Propriedades Mecânicas dos Aços	41
3 MATERIAL E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	42
3.1. Material	42
3.2. Corte de Amostras	43
3.3. Tratamentos Térmicos	44
3.4 Posição de Retirada e Geometria dos Corpos de Prova das Amostras	47
3.5 Ensaio de Tração	49
3.6 Ensaio de Impacto	49
3.7 Medição de Microdureza	52
3.8 Caracterização Microestrutural	52
3.9 Caracterização Fractográfica	53

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	54
4.1. Propriedades Mecânicas	54
4.1.1. Ensaio de Tração	54
4.1.2. Ensaio de Impacto	57
4.2. Microdureza	62
4.3 Caracterização Microestrutural	64
4.4 Caracterização Fractográfica	90
4.5 Considerações Finais	99
5 CONCLUSÕES	101
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

Lista de figuras

Figura 2.1 - Variação das propriedades mecânicas com o refino do tamanho de grão para os aços ARBL	21
Figura 2.2 – Efeito da exposição na faixa de temperatura de 450 a 500°C de fragilização no revenido em aços Cr-Ni comerciais e de alta pureza.	26
Figura 2.3 - Influência do fósforo e antimônio na energia de impacto em função da temperatura de revenido de um aço 1 ½ % Ni-Cr-Mo.	30
Figura 3.1 – Variação de temperatura do forno com a porta aberta.	44
Figura 3.2 - Variação de temperatura do forno com a porta fechada.	44
Figura 3.2 – Posição de retirada de corpos de prova das amostras.	47
Figura 3.4 – Geometria do corpo de prova de tração.	48
Figura 3.5 – Geometria do corpo de prova Charpy.	48
Figura 3.6 – Desenho da máquina de impacto Charpy.	50
Figura 3.7 – Posição do corpo de prova Charpy.	51
Figura 4.1 – Energia de impacto em função do tempo de revenido.	59
Figura 4.2 - Energia de impacto em função da temperatura para a condição aberta.	60
Figura 4.3 – Energia de impacto em função da temperatura para a condição fechada.	60
Figura 4.4 – Energia de impacto em função da temperatura de revenido.	61
Figura 4.5 - Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 1. Aumento de 100x.	65
Figura 4.6 - Idem figura anterior. Presença de traços de bainita (áreas mais claras). Aumento de 500x.	65
Figura 4.7 - Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 2. Aumento de 100x.	66
Figura 4.8 - Idem figura anterior. Presença de martensita revenida. Aumento de 500x.	66
Figura 4.9 - Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 3. Aumento de 100x.	67
Figura 4.10 - Idem figura anterior. Presença de martensita revenida (áreas mais escuras) e traços de bainita. Aumento de 500x.	67

- Figura 4.11** - Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 4. Aumento de 100x. 68
- Figura 4.12** - Idem figura anterior. Presença de martensita revenida (áreas mais escuras). Aumento de 500x. 68
- Figura 4.13** - Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 5. Aumento de 100x. 69
- Figura 4.14** - Idem figura anterior. Presença de martensita revenida. Aumento de 500x. 69
- Figura 4.15** - Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 6. Aumento de 100x. 70
- Figura 4.16** - Idem figura anterior. Presença de martensita revenida e traços de bainita (áreas mais claras). Aumento de 500x. 70
- Figura 4.17** - Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 7. Aumento de 100x. 71
- Figura 4.18** – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida (áreas mais escuras) e traços de bainita. Aumento de 500x. 71
- Figura 4.19** – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 8. Aumento de 100x. 72
- Figura 4.20** – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida (áreas mais escuras). Aumento de 500x. 72
- Figura 4.21** – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 9. Aumento de 100x. 73
- Figura 4.22** – Idem figura anterior. Presença de traços de bainita. Aumento de 500x. 73
- Figura 4.23** – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 10. Aumento de 100x. 74
- Figura 4.24** – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida e traços de bainita (áreas mais claras). Aumento de 500x. 74
- Figura 4.25** – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 11. Aumento de 100x. 75
- Figura 4.26** – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida (áreas mais escuras). Aumento de 500x. 75
- Figura 4.27** – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 12. Aumento de 100x. 76

- Figura 4.28** – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida e traços de bainita (áreas mais claras). Aumento de 500x. 76
- Figura 4.29** – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 13. Aumento de 100x. 77
- Figura 4.30** – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida (áreas mais escuras). Aumento de 500x. 77
- Figura 4.31** – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 14. Aumento de 100x. 78
- Figura 4.32** – Idem figura anterior. Presença de traços de bainita (áreas mais claras). Aumento de 500x. 78
- Figura 4.33** – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 15. Aumento de 100x. 79
- Figura 4.34** – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida (áreas mais escuras). Aumento de 500x. 79
- Figura 4.35** – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 16. Aumento de 100x. 80
- Figura 4.36** – Idem figura anterior. Presença de martensita (áreas mais escuras). Aumento de 500x. 80
- Figura 4.37** – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 17. Aumento de 100x. 81
- Figura 4.38** – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida (áreas mais escuras). Aumento de 500x. 81
- Figura 4.39** – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 18. Aumento de 100x. 82
- Figura 4.40** – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida e traços de bainita (áreas mais claras). Aumento de 500x. 82
- Figura 4.41** – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 19. Aumento de 100x. 83
- Figura 4.42** – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida (áreas mais escuras). Aumento de 500x. 83
- Figura 4.43** – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 20. Aumento de 100x. 84

Figura 4.44 – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida e bainita (áreas mais claras). Aumento de 500x.	84
Figura 4.45 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 21. Aumento de 100x.	85
Figura 4.46 – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida e bainita (áreas mais claras). Aumento de 500x.	85
Figura 4.47 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 22. Aumento de 100x.	86
Figura 4.48 – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida (áreas mais escuras). Aumento de 500x.	86
Figura 4.49 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 23. Aumento de 100x.	87
Figura 4.50 – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida e traços de bainita (áreas mais claras). Aumento de 500x.	87
Figura 4.51 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 24. Aumento de 100x.	88
Figura 4.52 – Idem figura anterior. Presença de martensita (áreas mais escuras). Aumento de 500x.	88
Figura 4.53 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 25. Aumento de 100x.	89
Figura 4.54 – Idem figura anterior. Presença de martensita (áreas mais escuras). Aumento de 500x.	89
Figura 4.55 – Superfície de fratura da condição 8. Aumento de 2000x.	90
Figura 4.56 – Idem figura anterior. Aumento de 3000x.	91
Figura 4.57 – Superfície de fratura da condição 16. Aumento de 2000x.	91
Figura 4.58 – Idem figura anterior. Aumento de 3000x.	92
Figura 4.59 – Superfície de fratura da condição 19. Aumento de 2000x.	92
Figura 4.60 – Idem figura anterior. Aumento de 3000x.	93
Figura 4.61 – Superfície de fratura da condição 20. Aumento de 2000x.	93
Figura 4.62 – Idem figura anterior. Aumento de 3000x.	94
Figura 4.63 – Superfície de fratura da condição 21. Aumento de 2000x.	95
Figura 4.64 – Idem figura anterior. Aumento de 3000x.	95
Figura 4.65 – Superfície de fratura da condição 22. Aumento de 2000x.	96
Figura 4.66 – Idem figura anterior. Aumento de 3000x.	96

Figura 4.67- Superfície de fratura da condição 23. Aumento de 2000x.	97
Figura 4.68 - Idem figura anterior. Aumento de 3000x.	97
Figura 4.69- Superfície de fratura da condição 24. Aumento de 2000x.	98
Figura 4.70- Idem figura anterior. Aumento de 3000x.	98

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Fontes de Inclusões.	34
Tabela 3.1 – Composição Química do material (% em peso)	42
Tabela 3.2 – Quadro Resumo dos Diferentes Tratamentos Térmicos Adotados.	46
Tabela 3.3 – Parâmetros adotados no ensaio de tração.	49
Tabela 3.4 - Parâmetros adotados no ensaio de impacto.	52
Tabela 4.1 – Propriedades Mecânicas do aço SAE 4140.	55
Tabela 4.2 – Resultados de ensaio de impacto do aço SAE 4140.	58
Tabela 4.3 – Resultados de microdureza do aço SAE 4140.	63